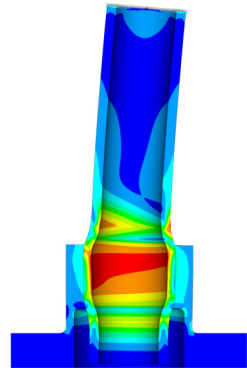


# Übertragungsfähigkeit innenhochdruckgefügter Pressverbindungen

Hilgermann, J.L.; Schäfer, G.

*Als Ergebnis eines weiteren Forschungsvorhabens am IMW zu innenhochdruckgefühten Pressverbindung werden numerisch berechnete Formzahlen und Berechnungsgrundlagen zu Flächenpressung und Klaffkraft vorgestellt. Kerbwirkungszahlen für Biegung und Torsion ergänzen die numerischen Grundlagen zu einer Dimensionierungsrichtlinie für IHF-Pressverbindungen.*



*Internal press-fit connections are commonly used in cam shafts. For such applications it is possible to do a lot of numerical simulations and experimental test before SOP. To use the internal press-fit connection in small-scale applications, it is necessary to have an easy to use design guideline. This report shows some results of the generalized basic research work carried out by IMW to build up such a guideline.*

## 1 Einleitung

Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen stellen eine wirtschaftlich interessante und innovative Alternative zu klassischen Pressverbindungen dar. Bei dem Fügeverfahren wird die kraftschlüssige Verbindung zwischen Welle und Nabe durch eine hydraulische Aufweitung der Hohlwelle erzielt. Das Verfahren hat gegenüber der klassischen Pressverbindung Vorteile hinsichtlich des Leichtbaus, der erforderlichen Fertigungstoleranzen und damit den Kosten. Anwendung findet das Verfahren zurzeit in der Massenfertigung im Automobilbau an Nocken- und Steuerwellen. Das Potential, dieser auf Leichtbau ausgerichteten Verbindungstechnik, umfasst aber ein breiteres Spektrum der Antriebstechnik im Maschinen-, Fahrzeug- und Apparatebau und ist neben der Massenindustrie auch gerade für kleine Stückzahlen sehr wirtschaftlich.

Die Verbindung wurde bisher nur für den Einzelfall empirisch erprobt und optimiert. Eine allgemeine analytische Dimensionierung der Verbindung war bisher nicht möglich.

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes wurde auf der Basis umfangreicher numerischer Simulationen und experimenteller Untersuchungen ein einfach einzusetzendes Modell zur Dimensionierung unter statischen und dynamischen Betriebslasten entwickelt /1/. Das Modell ermöglicht dem Anwender erstmals eine analytische Berechnung durchzuführen. Damit ist der Einsatz innenhochdruckgefügter Pressverbindungen auch bei Kleinserien einfach zu planen und wirtschaftlich sinnvoll.

## 2 Innenhochdruckfügen

Innenhochdruckfügen erfolgt durch eine plastische Aufweitung einer Hohlwelle unter Innendruck. Abbildung 1 zeigt schematisch den Fügeprozess des Innenhochdruckfügens. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet (Abb. 1, links). Der Raum unterhalb der Nabe wird mit Druck beaufschlagt, dabei weitet sich die Welle plastisch und die Nabe elastisch (Abb. 1, mitte). Durch die gezielte Materialkombination verbleiben nach der Druckrücknahme in der Nabe tangentielle Zugspannungen, die für einen festen Presssitz sorgen (Abb. 1, rechts).

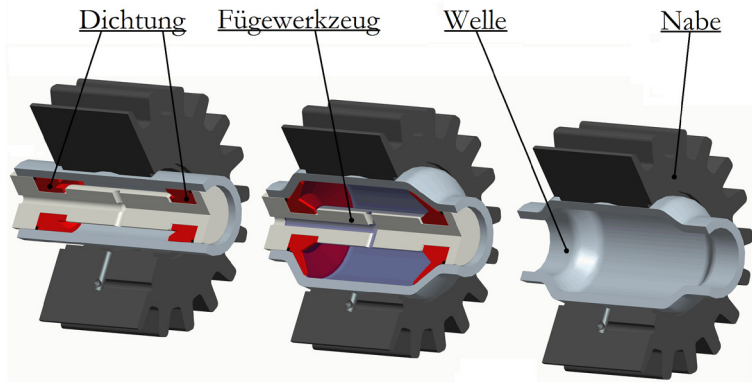


Abbildung 1: Innenhochdruckfügen einer Welle-Nabe-Verbindung

## 3 Stand der Technik zur Berechnung der IHF-Verbindung

Für die Berechnung des mittleren Passfugendruckes existieren in der Literatur verschiedene Ansätze. Wesentliche Arbeiten wurden von /2/, /3/ und /4/ veröffentlicht. Die Bestimmung des Anrissortes erfolgt meist durch das Ruiz, bzw. das erweiterte Ruiz-Kriterium /5/. Die

Vorhersage der Bauteillebensdauer wird über Schädigungsparameter vorgenommen /6/. Daneben finden sich Arbeiten, die einen zulässigen Grenzschlupf sowie Formzahlen für die Dimensionierung anwenden.

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 1 stellt den Versuchsplan der Lebensdauerversuche unter umlaufender Querkraftbiegung und dynamischer Torsion dar. Die Versuche zielten auf die Ermittlung der Dauerfestigkeit (Grenze der Beanspruchbarkeit bei  $1 \times 10^7$  Lastwechsel). Alle Geometrieparameter beziehen sich auf einen Fügedurchmesser von 25mm. Die Drucküberstandslänge beschreibt den Abstand zwischen der Nabenstirnseite und der Dichtungsposition. Alle Proben wurden nach Versuchsende aufgetrennt und mikroskopisch untersucht. Hierbei wurden die Oberflächen auf Schäden, Risse, sowie Ort und Ausprägung von Passungsrost und Verschleiß untersucht. Die Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen numerisch ermittelter Schädigungsparameter verglichen.

Tabelle 1: Versuchsplan für umlaufende Querkraftbiegung und dynamische Torsion

Nabenwerkstoff	Fügelänge $l_F/D_F$	Naben-Ø-verhältnis $Q_A$	Drucküberstandslänge $l_{\bar{U}}/D_F$
42CrMo4	0,56	0,56	0,06
		0,63	0,06
			0,02
		0,72	0,06
	0,80	0,56	0,06
		0,63	0,06
			0,02
		0,72	0,06
	2,00	0,56	0,06
		0,63	0,06
			0,02
		0,72	0,06
AlCuMnPb	0,80	0,63	0,10
Summe der Versuchsproben			150

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Lebensdauerversuche unter umlaufender Querkraftbiegung

Die Versuchsergebnisse unter umlaufender Querkraftbiegung genügen für große Nabenlängen  $l_F/D_F > 0,8$  einer Wöhlerlinie mit der Steigung  $k = 7,39$  und einer Dauerfestigkeit von  $S_D = 105,32\text{MPa}$ .

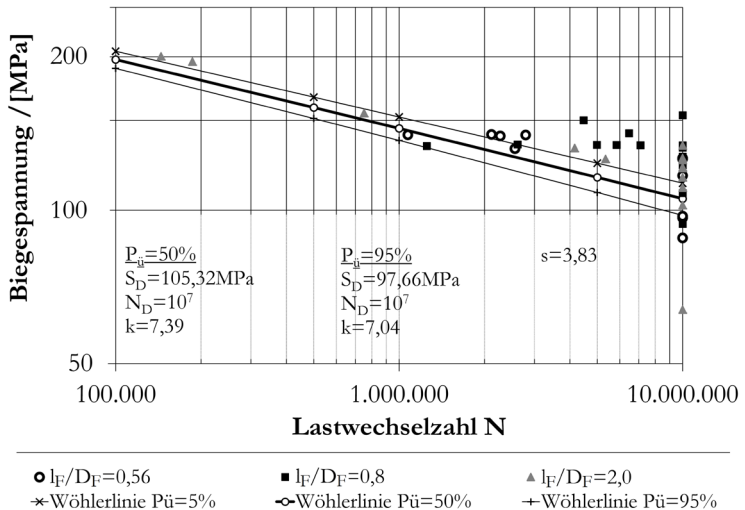


Abbildung 2: Wöhlerlinie der Versuche auf Umlaufbiegung.

Die in Abbildung 2 angegebene Biegespannung bezieht sich auf die Welle. Die im Diagramm dargestellten Datenpunkte gelten für ein Durchmesser Verhältnis  $0,56 \leq Q_A \leq 0,72$  und mit einer Mindestwahrscheinlichkeit von 95% auf Basis der t-Verteilung

Die Versuchsproben mit einer Fügellänge  $l_F/D_F \leq 0,8$  zeigen keine ausgeprägte Zeitfestigkeit auf. Im Lasthorizont von 130MPa bis 140MPa wurden Ausfälle bei  $10^6$  Lastwechsel genauso beobachtet wie Durchläufer bei  $10^7$  Lastwechsel. Es wird daher empfohlen Naben mit einer Fügellänge  $l_F/D_F \leq 0,8$  auf Grundlage der Klaffkraft nach Gleichung (1) zu dimensionieren. Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen zeigen zum Nabenrand ein Klaffen. Die Berechnung einer Klaffkraft ist nur eingeschränkt möglich. In dieser Arbeit wird das Klaffen der Verbindung definiert als der Beginn der Plastifizierung der Welle durch Einwirkung eines äußeren

Biegemomentes. Für die analytische Berechnung wurden Formzahlen numerisch ermittelt. Die analytische Berechnung des zulässigen Biegemomentes in Anlehnung konventioneller Pressverbindungen hat sich als nicht praktikabel erwiesen. Grund hierfür ist der zum Nabenrand hin abfallende Passfugendruck.

$$\frac{R_{p0,2}}{S} \geq K_{t,max,b} \cdot \sqrt{\left(\frac{M_b}{W_b}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{F_Q}{A}\right)^2} \quad (1)$$

Dabei ist  $K_{t,max,b}$  die Formzahl für die Biegung an der Stelle der maximalen Beanspruchung. Sie wird numerisch bestimmt und ist in Tabelle 2 aufgeführt. Das Widerstandsmoment  $W_b$  und der Querschnitt  $A$  beziehen sich entweder auf die Welle oder die Nabe. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Sicherheit  $S$  von 1,0 bis 1,2 ausreichend ist, wenn mit einer Erhöhung der Übertragbarkeit (Trainiereffekt) zu rechnen ist. Durch eine Erhöhung des Reibungswertes verringert sich die Formzahl  $K_{t,max,b}$ .

Im Gegensatz zum Spannungsverlauf konventioneller Pressverbindungen, befindet sich das Spannungsmaximum innenhochdruckgefügter Pressverbindungen meist axial im Inneren der Verbindung und nicht am Nabenrand. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit jeweils 2 Formzahlen für die Verbindung anzugeben. Eine Formzahl  $K_{t,0}$  für die Berechnung des Spannungszustandes am Nabenrand und eine Formzahl  $K_{t,max}$  für die Berechnung des maximalen Spannungszustandes in der Verbindung. Die Formzahlen werden auf Basis einer Finite-Elemente Simulation unter statischer Biegelast ermittelt. Dabei wird der Spannungszustand nach der Fügesimulation vom Spannungszustand unter statischer Biegelast subtrahiert. Die Biegespannung entspricht für diese Verbindung der Spannungs Komponente in axialer Richtung. Diese wird ins Verhältnis mit der analytischen Biegespannung einer ungekerbten Probe gesetzt und die Formzahl gebildet. Die durch den Fügeprozess bedingte Axialspannung im Bereich des Nabenrandes wird vernachlässigt. Ihr Einfluss wird durch eine Mindestsicherheit von 1,25 berücksichtigt.

Tabelle 2: Formzahl  $K_{t,max,b}$  zur analytischen Berechnung der Klaffkraft innenhochdruckgefügter Pressverbindungen mit  $0,6 \leq l_F/D_F \leq 0,8$  und  $Q_l = 0,76$ , St/St-Paarung

	$K_{t,max,b}$		
$l_F/D_F$	$Q_A = 0,56$	$Q_A = 0,63$	$Q_A = 0,72$
0,6	4,19	4,10	4,06
0,8	3,17	3,11	2,93

## 5.2 Lebensdauerversuche unter dynamischer Torsion

Ein Versagen der Verbindung unter reiner Torsionslast wurde bis  $10^7$  Lastwechsel nicht beobachtet. Zwar kam es vereinzelt zu einem Versagen der Probe, dieses trat aber an der Einspannung oder im Grundwerkstoff der Welle (Grenze für das Prüfmoment) auf. Es konnte daher keine Wöhlerlinie erstellt werden.

Die Proben wurden nach dem Dauerversuch aufgetrennt und deren Kontaktoberflächen mikroskopisch untersucht. Im Vergleich zu den Schädigungen nach Umlaufbiegung ist die Oberfläche nach Torsionsbeanspruchung im Allgemeinen weniger beansprucht und die Ausdehnung der Schädigung geringer ausgeprägt. Zwar sind auch hier relativ großflächige Oberflächenschäden, teilweise mit Einschränkung der Tragfähigkeit, zu erkennen, diese führten jedoch bei keiner Probe zu einem vorzeitigen Versagen.

## 6 Literatur

- /1/ Hilgermann, J. L.: Dimensionierung Innenhochdruckgefügter Pressverbindungen mit überwiegendem Kraftschluss unter dynamischen Lasten. Dissertation 2014. TU Clausthal
- /2/ Garzke, M.: Die Auslegung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter Drehmoment-belastung. Dissertation 2001. TU Clausthal. VDI-Verlag. ISBN 3-18-335001-7
- /3/ Grünendick, T.: Die Berechnung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen. Dissertation 2004. TU Clausthal. Papierflieger. Clausthal-Zellerfeld. 2005. ISBN 978-3897207950
- /4/ Marrè, M.: Grundlagen der Prozessgestaltung für das Fügen durch Weiten mit Innenhochdruck. Dissertation 2009. TU Dortmund. Shaker Verlag. ISBN 978-3-8322-8361-2
- /5/ Vidner, J.; Leidich, E.: Enhanced Ruiz criterion for the evaluation of crack initiation in contact subjected to fretting fatigue. International Journal of Fatigue. Bd. 29 (2007) S. 2040-2049
- /6/ Shin, K.S.: Prediction of fretting fatigue behavior under elasticplastic conditions. Journal of Mechanical Science and Technology. Bd. 23 (2009). S. 2714-2721